

**Evaluación de la calidad de enlaces de telecomunicaciones a través de herramientas de estimación del ancho de banda disponible en redes de computadores heterogéneas.**

**Mercado Pérez Luis Eduardo**

**Ortiz Canedo Daniel Guillermo**



**Universidad de la Costa – CUC**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería de Sistemas**

**Barranquilla, Atlántico**

**2020**

**Evaluación de la calidad de enlaces de telecomunicaciones a través de herramientas de estimación del ancho de banda disponible en redes de computadores heterogéneas.**

**Mercado Pérez Luis Eduardo**

**Ortiz Canelo Daniel Guillermo**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de:**

**Ingeniero de Sistemas**

**Director:**

**Dixon David Salcedo Morillo, Ph.D**

**Codirector:**

**Jorge Luis Diaz Martínez, Ms.C**

**Corporación Universidad de la Costa – CUC**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería de Sistemas**

**Barranquilla, Atlántico**

**2020**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

---

Barranquilla, Julio 2020

### **Agradecimientos**

Gracias a Dios por permitirme dar un paso más en la vida, sin su voluntad esto no sería posible.

A mi madre Carmen Pérez Sierra Por todo el esfuerzo y dedicación, por sus enseñanzas y valores inculcados, por siempre enseñarme que podemos llegar a donde queremos. A mi padre Eduardo Mercado Villa quien siempre me incentivó a ser un gran profesional.

A mi esposa Durbis Gutierrez Sierra gracias por el apoyo y el tiempo que me brindaste para alcanzar este logro; a mi hijo Luis Eduardo Mercado Gutiérrez por ser ese estímulo que me impulso a retomar el camino, aunque no fue fácil fuiste ese gran motor.

A mi familia en general, hermanos, tíos, primos; gracias por la confianza y por el apoyo.

A nuestro tutor Dixon Salcedo, gracias por las enseñanzas, tiempo y confianza.

Luis Eduardo Mercado Pérez

Gracias a Dios por permitirme llegar a donde estoy a pesar de dificultades y problemas.

Gracias a mis padres que siempre dieron todo de si para que yo llegar a ser lo mejor que puedo ser, siempre respetaron y apoyaron mis sueños, y por darme la confianza de que iba a hacer lo mejor con mi futuro.

Gracias a mis compañeros, que me estuvieron dando ánimos, consejos, y muchas veces incluso me estuvieron recordando mis objetivos

Gracias a nuestro tutor Dixon Salcedo por ayudarnos, apoyarnos y enseñarnos, además por tener la confianza en nosotros para permitirnos desarrollar esta investigación.

Daniel Ortiz Canedo

### Resumen

En la actualidad, la red global “Internet” ha sido el medio a través del cual las empresas, universidades, colegios, hogares y personas desarrollan las actividades de telecomunicaciones. La infraestructura de las empresas proveedoras de internet cada día se enfrenta a nuevos desafíos debido al crecimiento de la demanda con mayor contenido, como es el caso del vídeo streaming, webinar, clases virtuales, procesamiento de datos, almacenamiento y procesamiento en la nube. Así mismo, dado el alto consumo de datos en le redes de computadores, actualmente se ha dificultado mantener niveles óptimos de calidad de servicio, las aplicaciones de red demandan más recursos de telecomunicaciones siendo este, uno de los principales motivos de mantener dichos niveles. Aunque, las infraestructuras de red que soportan esas aplicaciones han evolucionado, es necesario una mayor y eficiente administración de los enlaces troncales, que juegan un rol primario en el sostenimiento de los servicios. Así, evaluar la calidad de enlaces de telecomunicaciones en redes de computadores heterogéneas con la ayuda de herramientas de estimación del ancho de banda disponible (ab\_disp), es hallar los valores que permitan mejorar el rendimiento de varios protocolos y aplicaciones que se pueden implementar en redes heterogéneas. Para realizar una estimación del ab\_disp, las herramientas actuales insertan en la red evaluada paquetes adicionales de prueba, que son llamados Sobrecarga (Overhead). En consecuencia, la sobrecarga convierte las herramientas de análisis de estimación de ancho de banda disponible, en intrusivas al utilizar parte del ancho de banda del canal que están midiendo. Por lo tanto, este proyecto se llevará a cabo la evaluación del rendimiento de los enlaces troncales, cableado e inalámbrico en una infraestructura de redes de computadores heterogéneas, utilizando herramientas de estimación de ancho de banda disponible como IGI, Pathload y Traceband. Así, para la evaluación experimental de los enlaces, se implementaron dos escenarios

reales de red, donde el tráfico cruzado fue generado de manera sintética utilizando la herramienta Mgen. Finalmente, este estudio permitió comprobar que las métricas de las herramientas de estimación se pueden utilizar para evaluar y conocer el rendimiento de enlaces cableados e inalámbricos, demostrando que pueden ser confiables hasta en un 96% para desarrollar labores administrativas de red.

***Palabras Clave:*** ancho de banda, herramientas, infraestructura, enlaces, troncales, redes heterogéneas, tráfico cruzado

### **Abstract**

Currently, the global network "Internet" has been the medium through which companies, universities, schools, homes and individuals carry out telecommunications activities. The infrastructure of Internet provider companies faces new challenges every day due to the growth in demand with more content, such as video streaming, webinars, virtual classes, data processing, storage, and cloud processing. Given the high data consumption at present it has been difficult to maintain optimal levels of quality of service, network applications demand more telecommunications resources. Although the network infrastructures that support these applications have evolved, there is a need for greater and more efficient administration of the trunk links, which play a primary role in sustaining services. To evaluate the quality of telecommunications links in heterogeneous computer networks with the support of Available Bandwidth Estimation (ab\_bw) Tools, is to find the values that allow improving the performance of various protocols and applications that can be implemented in heterogeneous networks. To estimate the ab\_bw, the current tools insert test packages in addition to those already existing on the network. This additional traffic in a network is called Overhead, which will allow the bandwidth estimation analysis tools to be intrusive when using part of the channel bandwidth that they are measuring. In this project, the performance evaluation of the trunks, wired and wireless will be carried out in a heterogeneous computer network infrastructure, using available bandwidth estimation tools such as IGI, Pathload and Traceband. Thus, for the experimental evaluation of the links, two real network scenarios were implemented, where the cross traffic was generated synthetically using the Mgen tool. This study verified that the metrics of the estimation tools can be used to evaluate and know the performance of wired and wireless links, which can be up to 96% reliable for network administrative tasks.



***Keywords:*** bandwidth, tools, infrastructure, links, trunks, heterogeneous networks, cross traffic

**Contenido**

Lista de tablas, figuras y ecuaciones .....	13
Introducción .....	15
1 Planteamiento del problema .....	16
1.1 Descripción del problema.....	16
1.2 Pregunta problema.....	17
2 Justificación .....	17
3 Objetivos.....	18
3.1 General .....	18
3.2 Objetivos específicos: .....	18
4 Marco referencial.....	18
4.1 Estado del arte .....	18
5 Marco conceptual .....	20
5.1 Ancho de banda, Bandwidth .....	20
5.2 Técnicas de estimación de ancho de banda disponible. ....	24
5.2.1 Métodos PRM (Packet Rate Method). ....	24
5.2.2 Métodos PGM (Packet Gap Method). ....	25
5.3 Herramientas de estimación de ancho de banda disponible (ABET's). ....	27
5.4 TestBed.....	30
5.4.1 Definición. ....	30

5.5	Redes Wireless .....	31
5.5.1	Definición .....	31
5.5.2	Tipos de redes Wireless .....	32
5.5.2.1	WPAN(Wireless Personal Area Network) .....	32
5.5.2.2	WLAN: (Wireless Local Area Network) .....	32
5.5.3	Tipos de ondas posibles. ....	33
5.5.3.1	Ondas de Radio .....	33
5.5.3.2	Microondas Terrestres .....	33
5.5.3.3	Microondas por Satélite .....	33
5.5.3.4	Infrarrojo .....	33
5.6	Redes heterogéneas de computadoras. ....	34
5.6.1	Definición. ....	34
5.7	Redes híbridas. ....	34
5.7.1	Definición. ....	34
5.7.2	Tipos de redes híbridas. ....	35
6	Marco legal .....	35
6.1	Internacional .....	35
6.2	Nacional .....	35
6.2.1	Ley No. 1341 de 30 Julio de 2009 .....	35
6.2.1.1	Artículo 11 – Acceso al uso del espectro Radioeléctrico.....	35

6.2.1.2	Artículo 19 - Creación, naturaleza y objeto de la Comisión de Regulación de Comunicaciones.....	36
6.2.1.3	Artículo 34 – Naturaleza y Objeto del Fondo de tecnologías de la información y las comunicaciones. ....	36
6.2.1.4	Artículo 35 – Funciones del fondo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.....	36
6.2.2	Resolución 5397 de 2018.....	37
7	Diseño metodológico.....	38
7.1	Tipo de Investigación y alcance.....	38
7.2	Área de estudio y Montaje de Pruebas.....	39
7.3	Fases de la Investigación.....	40
7.3.1	Fase 1: Desarrollo de la Investigación.....	40
7.3.2	Fase 2: Construcción Testbed.....	41
7.3.3	Fase 3: Análisis estadístico.....	45
7.4	Herramientas ab_disp evaluadas:.....	46
8	Resultados y análisis.....	47
9	Conclusiones.....	53
10	Referencias.....	55

### Lista de tablas, figuras y ecuaciones

#### Tablas

Tabla 1. Herramientas de estimación del ancho de banda disponible en redes de computadores heterogéneas.....	29
Tabla 2. Descripción del proceso investigativo. ....	38
Tabla 3. Características de los hosts .....	43
Tabla 4. Descripción de pruebas .....	45
Tabla 5. Herramientas ab_disp evaluadas.....	46

#### Figuras

Figura 1. Representación gráfica del ancho de banda disponible. Fuente (C. Guerrero & Labrador., 2010b).....	21
Figura 2. Enlace Angosto y Apretado. Fuente (C. D. Guerrero, 2009) .....	21
Figura 3. Ancho de Banda Disponible en un período promedio de la escala de tiempo Fuente: (López Castell, 2012).....	23
Figura 4. Probe GAP Model (PGM). Modelo para estimación de ancho de banda disponible. Fuente (Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006) .....	25
Figura 5. Testbed especializado de red. ....	31
Figura 6. Laboratorio de redes CUC. Fuente: <a href="http://ingenieria.cuc.edu.co/ingenieria-de-sistemas/informacion-academica/laboratorios">http://ingenieria.cuc.edu.co/ingenieria-de-sistemas/informacion-academica/laboratorios</a> .....	39
Figura 7. Universidad de la Costa CUC. Fuente: Google Earth (2020) .....	40
Figura 8. Testbed de red especializado con troncal cableada .....	42
Figura 9. Testbed de red especializado con troncal inalámbrica. ....	44
Figura 10. Promedio de Ancho de banda disponible estimado en un enlace troncal cableado con 0% y 50% de tráfico cruzado. ....	48

Figura 11. Tiempo de estimación promedio para realizar una estimación en un enlace troncal cableado con 0% y 50% de tráfico cruzado. ....	49
Figura 12. Promedio para realizar una estimación en un enlace troncal inalámbrico con 0% y 50% de tráfico cruzado. ....	50
Figura 13. Tiempo de estimación promedio para realizar una estimación en un enlace troncal inalámbrico con 0% y 50% de tráfico cruzado. ....	51

### **Ecuaciones**

Ecuación 1. Formula del ancho de Banda Disponible. Fuente (C. Guerrero & Labrador., 2010b) .....	21
Ecuación 2. Formula del ancho de banda promedio disponible. Fuente (C. Guerrero & Labrador., 2010b). ....	22
Ecuación 3. Escala de tiempo promedio. Fuente. (Zhang, 2015) .....	22
Ecuación 4. Capacidad no utilizada promedio. Fuente: (López Castell, 2012) .....	23
Ecuación 5. Capacidad no utilizada mínima Fuente: (López Castell, 2012). ....	24
Ecuación 6. Ancho de Banda Disponible. Fuente(Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006) .....	26

## Introducción

El estimar el `ab_disp` ha sido una de las temáticas de mayor utilidad en los últimos años, muchos investigadores a nivel mundial han tenido la necesidad de utilizar esta información para mejorar la operación de diferentes aplicaciones de red y de esta manera poder cumplir los acuerdos de nivel de servicio, gestión de redes, ingeniería de tráfico y en tiempo real de los recursos de aprovisionamiento, control de flujo y congestión, la detección rápida de fallas, ataques de red y control de admisión (Nguyen, Tran, & Nguyen, 2014). Al poder estimar el `ab_disp` las empresas prestadoras de servicio podrían cumplir con las necesidades de los usuarios y garantizar un excelente servicio, sobre todo en estos tiempos en donde la mayoría de los hogares a nivel mundial tienen conectados por lo menos tres dispositivos y el consumo de datos cada día aumenta considerablemente. (Jiménez Velásquez, 2019; Londoño, Muñoz, & Golondrino, 2019; Salcedo, Guerrero, & Martinez, 2018).

Este proyecto evalúa la calidad de los enlaces de telecomunicaciones mediante herramientas de estimación `ab_disp` en redes heterogéneas; específicamente, el rendimiento de la exactitud de la estimación en un escenario controlado que emule el comportamiento de una red en la Internet. Para lograr esto, primero se investigan e identifican las herramientas que cumplen con los requisitos para la evaluación, aquellas que más se ajusten a la problemática de estimación de `ab_disp`. Una vez definido, se crea una infraestructura de red que permite evaluar estimadores de `ab_disp` simulando el comportamiento del internet (Testbed). Sobre la infraestructura del testbed se realizan las pruebas individualmente para cada herramienta, de modo que se evidencie el comportamiento de cada una usando envío de paquetes sintéticos o del propio tráfico de la red evaluada.

## **1 Planteamiento del problema**

### **1.1 Descripción del problema**

El estudio y medición del rendimiento de las redes tipo WAN, siendo internet la más representativa, ha tenido un gran interés por parte de la comunidad de investigadores, enfocándose en un aspecto llamado *ab\_disp*, debido a múltiples aplicaciones en diferentes áreas como: cumplimiento de los acuerdos de nivel de servicio, gestión de redes, ingeniería de tráfico, control de flujo, congestión y en tiempo real de los recursos de aprovisionamiento.(Rizwan, Shabbir, Shabbir, Ahmad, & Sattar, 2019; Yáñez-Sánchez et al., 2019)

El crecimiento de la demanda del tráfico en Internet y la necesidad de ofrecer servicios para alcanzar mejor rendimiento en las aplicaciones; han ido de la mano con las infraestructuras cableadas e inalámbricas de telecomunicaciones. Igualmente, se han generado métricas para evaluar y administrar servicios de red. La estimación del *ab\_disp* ha tomado gran importancia; debido a que es una métrica importante para la optimización del Calidad del Servicio, específicamente en protocolos de enrutamiento en redes Internet. Lo anterior, justifica los esfuerzos en realizar estudios comparativos del comportamiento de las herramientas de estimación de *ab\_disp*.(Bernhardt, 2019; Salcedo et al., 2018)

Por otra parte, los estudios no muestran un análisis real de los efectos que causa el rendimiento del flujo del tráfico en una infraestructura de red segmentos troncales inalámbricos, como la capacidad real del enlace, pérdida de paquetes, latencia real, entre otras(Hinostroza & Caden, 2015; Salcedo, Guerrero, & Guérrero, 2017). En consecuencia, surge la necesidad de realizar estudios para conocer el estado real del tráfico de datos.



## 1.2 Pregunta problema

Este proyecto surge de la necesidad de conocer de manera activa el estado real de los enlaces troncales en redes heterogéneas. Teniendo en cuenta lo anterior, surgió el siguiente interrogante, ¿Cómo se pueden evaluar los enlaces de telecomunicaciones en redes heterogéneas, utilizando herramientas de estimación `ab_disp`?

## 2 Justificación

En investigaciones anteriores (Salcedo et al., 2018, 2017) (Londoño et al., 2019) (Yáñez-Sánchez et al., 2019) se han utilizado herramientas para medir el `ab_disp` en redes de un solo tipo; dado que no se precisan investigaciones en redes heterogéneas surge la necesidad de valorar este tipo de herramientas en dichas redes.

Este proyecto evalúa y compara el tráfico en diferentes tipos de redes para observar si existe pérdida de paquetes, conocer la capacidad del ancho de banda, precisar cuál es el comportamiento de la red cuando se le introducen paquetes y observar la precisión de las herramientas. Esto permite analizar con mayor precisión los enlaces de telecomunicaciones que en la actualidad se han visto afectados debido al incremento de las conexiones inalámbricas y ha ocasionado una problemática para los proveedores de servicios (Internet, video llamadas, Streaming, VoIP, Etc.) dado que en muchas ocasiones presentan fallas en la calidad del servicio ofrecido, siendo la velocidad de transmisión de los datos y la estabilidad de estas métricas más afectadas.

De esta manera se demostrará que la evaluación y estimación en la calidad de los enlaces se pueden mejorar teniendo en cuenta los resultados encontrados en la implementación de las herramientas para `ab_disp`.

### 3 Objetivos

#### 3.1 General

Evaluar la calidad de enlaces de telecomunicaciones a través herramientas de estimación del ancho de banda disponible en redes de computadores heterogéneas.

#### 3.2 Objetivos específicos:

- Estudiar las características de las herramientas de estimación de ad\_disp más evaluadas en infraestructuras de redes de computadoras reales.
- Diseñar e implementar una infraestructura heterogénea de red de computadores real para evaluar las herramientas de ab\_disp
- Evaluar el comportamiento del tráfico en el enlace troncal cableado frente al enlace inalámbrico, respecto a latencia, capacidad, ancho de banda disponible, y paquetes perdidos.
- Comparar el rendimiento de las herramientas de ab\_disp respecto a precisión, tiempo de estimación, y sobrecarga introducida.

### 4 Marco referencial

#### 4.1 Estado del arte

Las redes de datos están conformadas por dispositivos que están conectados entre sí y generalmente reciben y envían información, por conexiones cableadas, transmisiones inalámbricas, satelitales, wimax, etc. Además de compartir información en ocasiones también pueden ofrecer servicios (Amaya Carrión, 2018).

Como se menciona anteriormente, el consumo de datos en la actualidad se ha incrementado y se requiere que el QoS<sup>1</sup> (calidad del servicio ) ofrecido sea optimo; en consecuencia, se vienen

---

<sup>1</sup> QoS: Quality of Service

realizando estudios que permitan reducir el overhead en las redes de comunicaciones (Jiménez Velásquez, 2019). El análisis que propone es evaluar algunas herramientas para observar el comportamiento de extremo a extremo del `ab_disp` en redes de computadoras heterogéneas. Se debe tener en cuenta que existe gran diferencia entre las redes cableadas y las redes inalámbricas, esto implica considerar otras variables como el ruido y las interferencias, que pueden generar el retraso o pérdida de paquetes.

Algunas de las investigaciones encontradas (C. Guerrero & Labrador., 2010a) (Nam, Kim, Lee, & Kim, 2013)(Li, Wu, & Chang, 2013)(Lakshminarayanan, Padmanabhan, & Padhye, 2004)(Reyes & Guerrero, 2016)(Salcedo et al., 2018, 2017) coinciden con nuestro proyecto; en esas investigaciones se describen y menciona la importancia del monitoreo, estudio y estimación del `ab_disp` sobre todo en la administración de las redes, permitiendo apreciar métricas de manera clara, modelos matemáticos y algoritmos implementados. Este conjunto es conocido como “ABETT’s<sup>2</sup>”(Técnicas de medición de ancho de banda Disponible)(C. Guerrero & Labrador., 2010a). Según (Prasad, Dovrolis, Murray, & Claffy, 2003) las Abett’s se pueden manejar en redes superpuestas, optimización de transporte extremo a extremo y la manera como se distribuyen los paquetes en una red punto a punto.

En cuanto a las redes inalámbricas en las investigaciones de (Hinostroza & Caden, 2015)(Bernhardt, 2019; Londoño et al., 2019; Lozoya, Martí, Velasco, Fuertes, & Ayza, n.d.; Nam et al., 2013) el estándar IEEE 802.16e (WIMAX) fue prometedor, pero actualmente no se usa. Otra tecnología inalámbrica y la más utilizada en la actualidad, es WIFI, conocido como el estándar IEEE 802.11; que ha permitido un gran desarrollo de las redes WLAN. En esta tecnología se encuentran diferentes estándares los cuales se viene implementado desde el año

---

<sup>2</sup> ABET’s: Available Bandwidth Estimation Techniques and Tools.

1999 con el estándar IEEE 802.11a. En la actualidad la mayoría de los dispositivos trabajan con velocidades máxima de 54 Mb (Sánchez, n.d.). Este tipo de redes ha cambiado la manera como las personas se pueden conectar al mundo de manera fácil y rápida, dado que la pueden utilizar en sitios públicos o privados; la gran desventaja que presentan estas redes está asociadas a la seguridad debido a que se puede presentar robo de información, por eso , es muy importante solo conectarse a redes confiables.

Las investigaciones nombradas describen el conocimiento y la capacidad de los investigadores para evaluar las herramientas conocidas para el análisis del ab\_disp entre ellas TraceBand, Pathload, IGI, PathChar y Spurge; estas aplican la métrica ab\_disp como parámetro. En el análisis que realizan en las redes inalámbricas sobre el comportamiento de tráfico, no tienen presente la infraestructura de la red.

Dicho esto, consideramos que este proyecto es diferente, en donde se comparan las herramientas en un escenario heterogéneo y no por separado.

## **5 Marco conceptual**

### **5.1 Ancho de banda, Bandwidth**

#### **5.1.1 Definición**

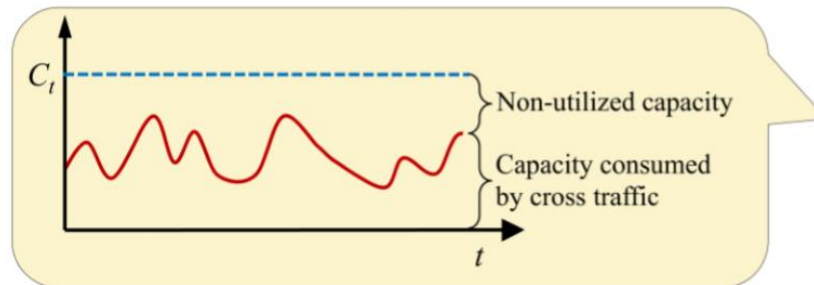
En sistemas digitales, el ancho de banda es la cantidad de datos que pueden ser transportados por algún medio en un determinado período de tiempo (Generalmente segundos). Por lo cual, a mayor ancho de banda, mayor transferencia de datos por unidad de tiempo (Mayor velocidad)<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> [http://www.alegsa.com.ar/Dic/ancho\\_de\\_banda.php](http://www.alegsa.com.ar/Dic/ancho_de_banda.php)

### 5.1.2 Ancho de Banda Disponible

El ancho de banda disponible ( $ab\_disp$ ) es la capacidad no utilizada en el enlace. Ver Figura 1 (C. D. Guerrero, 2009)



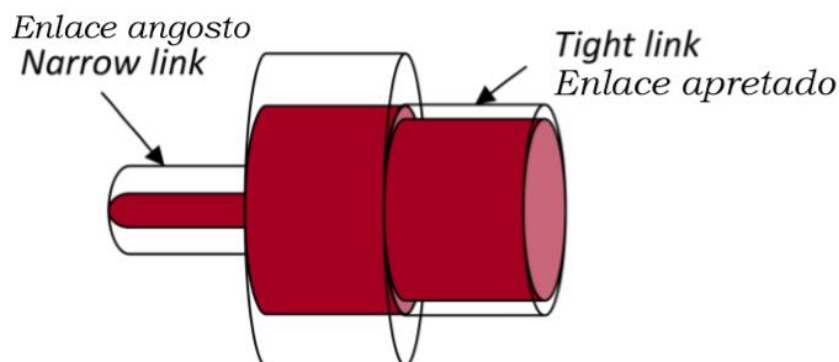
**Figura 1.** Representación gráfica del ancho de banda disponible. Fuente (C. Guerrero & Labrador., 2010b)

El cual estará dado por la siguiente expresión:

$$AB_i = C_i - (\text{Cross traffic})_i$$

**Ecuación 1.** Formula del ancho de Banda Disponible. Fuente (C. Guerrero & Labrador., 2010b)

El enlace con la tasa de transmisión mínima determina la capacidad del camino (Enlace estrecho – Narrow link), mientras que el enlace con el mínimo de capacidad no utilizada (Enlace apretado – Tight link) limita la capacidad del ancho de banda disponible (C. Guerrero & Labrador., 2010b) Ver figura 2 (C. D. Guerrero, 2009)



**Figura 2.** Enlace Angosto y Apretado. Fuente (C. D. Guerrero, 2009)

Para AB, el mínimo de todos los anchos de banda disponibles es igual a AB en el enlace apretado, y se puede denotar por (C. Guerrero & Labrador., 2010b):

### 5.1.3 Ancho de banda disponible de extremo a extremo (End to End).

$$AB_{path} = \min(AB_i) = AB_{tight\ link}$$

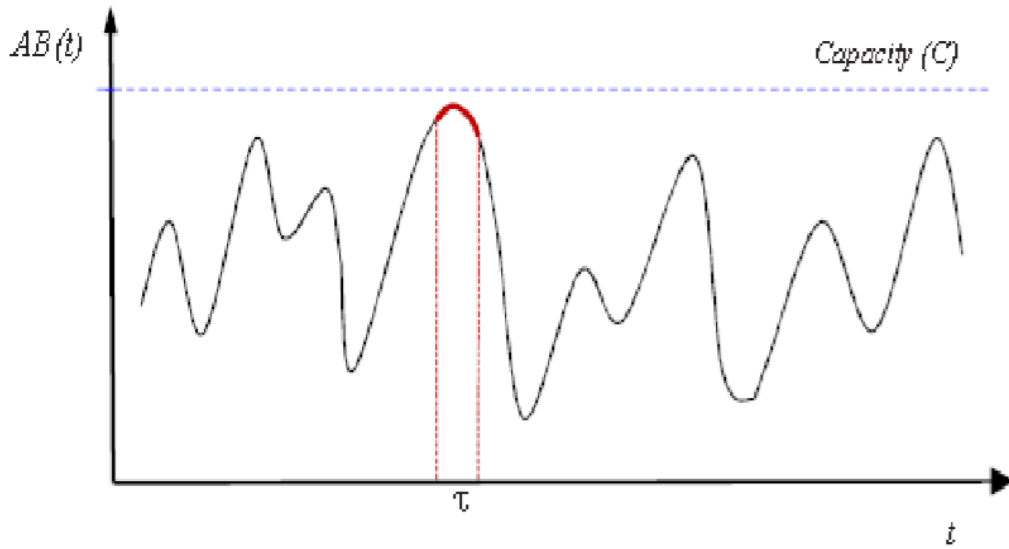
**Ecuación 2.** Formula del ancho de banda promedio disponible. Fuente (C. Guerrero & Labrador., 2010b).

El mínimo de todas las capacidades de enlace no utilizadas en toda la ruta de comunicación se llama ancho de banda disponible de extremo a extremo. Esta es una métrica variable en el tiempo que está relacionada con la utilización individual de cada enlace en toda la ruta.

Definiendo a T como la escala de tiempo promedio del ancho de banda disponible, la utilización promedio del enlace i para una muestra de tiempo  $\tau$ , se obtiene por medio de la ecuación 3.

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\tau} \int_t^{t+\tau} u_i(s) ds, \quad 0 \leq \bar{u}_i \leq 1$$

**Ecuación 3.** Escala de tiempo promedio. Fuente. (Zhang, 2015)



**Figura 3.** Ancho de Banda Disponible en un período promedio de la escala de tiempo Fuente: (López Castell, 2012)

Para un enlace  $i$  con una capacidad  $C_i$ , el ancho de banda disponible del enlace en el intervalo  $(t, t + \tau)$  se puede definir como la capacidad no utilizada promedio durante el tiempo  $T$  (Ver ecuación 4).

$$\bar{A}_i = C_i [1 - \bar{u}_i]$$

**Ecuación 4.** Capacidad no utilizada promedio. Fuente: (López Castell, 2012)

Para una ruta de extremo a extremo con  $H$  saltos, el ancho de banda disponible durante  $\tau$  lo da el enlace con la capacidad no utilizada mínima de todos los saltos, (Ver ecuación 5).

$$\bar{A} = \min_{i=1 \dots H} (\bar{A}_i)$$

**Ecuación 5.** Capacidad no utilizada mínima Fuente: (López Castell, 2012).

Tal como aparece en la ecuación 5, el enlace con la capacidad mínima se conoce como el narrow link (Enlace angosto) y el enlace con el mínimo ancho de banda disponible se conoce como el tight link (Enlace estrecho) (Ver figura 2), el cual se considera el cuello de botella de la ruta y el enlace que determina el ancho de banda disponible de extremo a extremo.

## **5.2 Técnicas de estimación de ancho de banda disponible.**

Las técnicas que más se utilizan actualmente son el ProbeGAP Model – PGM (Modelo de separación de pruebas), ambas son enfoques válidos y actualmente son implementadas en la mayoría de las herramientas vigentes para realizar estimaciones de ancho disponibles.

### **5.2.1 Métodos PRM (Packet Rate Method).**

Basado en los conceptos de congestión auto inducida; PRM se basa en la siguiente consideración, si se envía tráfico de prueba a una razón más baja que el ancho de banda disponible a través de un enlace, entonces, la razón más baja de llegada del tráfico de prueba debe coincidir con la razón a la cual fue enviado. Por el contrario, si la razón a la que se envía el tráfico de prueba es mayor que el ancho de banda disponible, se crea una cola en la red y el tráfico de prueba debe presentar retardo. Como resultado, la razón de los paquetes de prueba en el receptor debe ser menor que la de envío. De esta manera se puede medir el ancho de banda disponible, localizando el punto de retorno, en el cual los paquetes de prueba enviados y los recibidos, comienzan a coincidir. (Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006)

Las herramientas basadas en este método como el pathload, PTR y Pathchirp se basan en las siguientes observaciones (Lakshminarayanan et al., 2004):

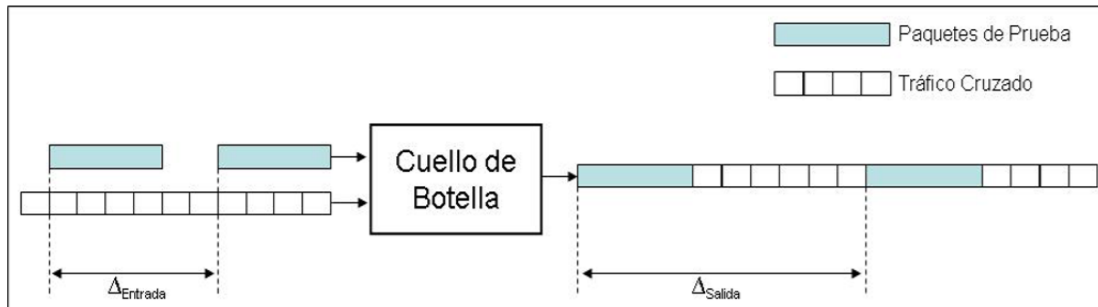
- Un tren de paquete de prueba enviados a una velocidad menor que el ancho de banda disponible debería ser recibido a la misma velocidad enviada (en promedio).



- Sin embargo, si la velocidad a la cual fue enviado excede el ancho de banda disponible, la velocidad de recepción es menor que la de transmisión y los paquetes de prueba van a tender a encolarse provocando retardo en ese sentido (OWD).
- Por lo tanto, el ancho de banda disponible puede ser estimado mediante la observación de la velocidad de transmisión en la cual sucede una transición entre estos dos comportamientos.

### 5.2.2 Métodos PGM (Packet Gap Method).

Este modelo hace uso de la información del espacio de tiempo entre la llegada sucesiva de dos paquetes de prueba al receptor. Un par de paquetes de prueba es enviado con un espacio determinado entre ellos  $\Delta_{Entrada}$  y llega al receptor con una distancia  $\Delta_{Salida}$ . Asumiendo un único cuello de botella y que la cola no se encuentra vacía entre el envío del primer y segundo paquete de prueba, entonces  $\Delta_{Salida}$  es el tiempo que le toma al cuello de botella transmitir el segundo paquete de prueba en el par y el tráfico cruzado que llega durante  $\Delta_{Entrada}$ , como se muestra en la figura 4. (Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006)



**Figura 4.** Probe GAP Model (PGM). Modelo para estimación de ancho de banda disponible. Fuente (Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006)

De esta forma, tenemos que el tiempo para transmitir el tráfico cruzado es  $\Delta_{Salida} - \Delta_{Entrada}$ , y tenemos que la razón de llegada del tráfico cruzado es  $\frac{\Delta_{Salida} - \Delta_{Entrada}}{\Delta_{Entrada}} \times C$ ,  $C$  es la capacidad del cuello de botella.

El ancho de banda disponible es dado por la ecuación 6:

$$A = C \times \left[ 1 - \frac{\Delta_{\text{Salida}} - \Delta_{\text{Entrada}}}{\Delta_{\text{Entrada}}} \right]$$

**Ecuación 6.** Ancho de Banda Disponible. Fuente(Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006)

Adicionalmente, las herramientas basadas en este método como Spruce, Delphi e IGI envían pares de paquetes de prueba de igual tamaño separados acorde al tiempo de transmisión de las pruebas sobre el cuello de botella del enlace. Si no se inserta “cross-traffic” entre los paquetes de prueba, el espacio entre los paquetes de prueba se mantiene hasta el destino. Por otro lado, el incremento del espacio entre paquetes de prueba se utiliza para estimar el volumen del “cross-traffic” el cual luego es restado de la capacidad estimada para obtener el valor del ancho de banda disponible estimado.

A diferencia de PRM, el PGM asume que el enlace comprometido es el enlace más estrecho del camino y es susceptible a retardos por encolamiento en los enlaces no comprometidos (Lakshminarayanan et al., 2004).

Ambos modelos usan trenes de paquetes para generar una medición y toman como ciertos los siguientes supuestos:

- La cola en todos los routers es atendida siguiendo el modelo FIFO (First in-First out).
- El tráfico cruzado sigue un modelo fluido.
- Las tasas de transmisión del tráfico cruzado cambian lentamente y de forma constante para cada medición.

Adicionalmente, el modelo PGM asume un único cuello de botella que puede ser el narrow link o el tight link para cada enlace de punto a punto. Estas consideraciones son necesarias para el análisis del modelo, pero las herramientas pueden trabajar, aún, si algunas de ellas no se cumplen (Carrasquilla Marín & Ulloque Rodríguez, 2006).

### **5.3 Herramientas de estimación de ancho de banda disponible (ABET's).**

Existen en la actualidad varias herramientas de estimación de ab\_disp, entre las más conocidas podemos citar las siguientes: Abing, Cprobe, IGI, Pathchirp, Pathchar, Pathload, Spurge y Traceband.

Existen dos herramientas para estimar la amplitud de banda disponible de extremo a extremo, que han sido consideradas como las más representativas, por sus requerimientos. La primera es conocida como Spruce y utiliza el método PGM, la segunda llamada Pathload, utiliza el método PRM (C. Guerrero & Labrador., 2010b).

Otra herramienta importante y la cual es el objeto de estudio en esta investigación, es llamada Traceband; es una herramienta cliente-servidor escrita en ANSI C, que utiliza la representación oculta descrita en las cadenas de Markov, en la dinámica de ancho de banda disponible para proporcionar estimaciones AN, rápidas y continua, y preciosas. El cliente Traceband se ejecuta por ciclos de diez estimaciones. En la primera estimación la herramienta envía 50 pares de paquetes UDP de 1498 bytes de longitud. Las restantes nueve estimaciones se realizan con 30 pares de paquetes cada una. Esta reducción es posible gracias a la introducción de HMM, que es capaz de aprender la dinámica AB con una muestra inicial y mantener el modelo actualizado con muestras de tamaño reducido. Lo que se encontró en la experimentación es que el reaprendizaje de cada una de las diez estimaciones fue suficiente para mantener una buena precisión con baja

sobrecarga de paquetes. Usando 50 pares de paquetes para entrenar el modelo, mostrando los mejores resultados de la estimación.

El método de estimación utilizado por Traceband es el Probe GAP Model, y basado en éste, utiliza valores diferentes para las instancias del intra-gap e inter-gap de los pares de paquetes. El intra-GAP se refiere al tiempo entre los dos paquetes de cada par de paquetes. El intra-gap o  $\Delta$ Entrada se especifica el tiempo en el emisor y es igual al tiempo de transmisión de un paquete único en el enlace apretado (Tight Link). De esta manera, el par de paquetes será capaz de capturar cross-traffic en la cola, si hubiere. El inter-GAP o  $\Delta$ Salida, se refiere al tiempo entre los pares de paquetes de sondeo. Es decir, el tiempo entre el segundo paquete de sondeo par  $(i-1)$  y el primer paquete de sondeo par  $i$ . Estos tiempos se obtienen utilizando la función `gettimeofday`, y sus valores son enviados al receptor de la carga útil del paquete. Al igual que Spruce.

Cada herramienta de acuerdo con la naturaleza de las métricas que evalúa tiene diferentes características que se describen en la Tabla 1

**Tabla 1.***Herramientas de estimación del ancho de banda disponible en redes de computadores heterogéneas.*

Herramienta	Opensource	Año	Evaluada Testbed	Enfoque de estimación	Técnicas de Estimación	Tipos estimación	Plataforma	Soporta Redes Alta velocidad
<b>Pathload</b>	GPL	2002	REAL	PRM	Activa	Automáticos periódicos - UDP	Linux	Si
<b>Traceband</b>	GPL	2010	REAL	PGM	Activa	Trenes o Pares de paquetes	Linux	Si
<b>Spurce</b>	GPL	2003	REAL	PGM	Activa	Trenes o Pares de paquetes	Linux	No
<b>Delphi</b>	GPL	2000	REAL	PGM	Activa	Trenes o Pares de paquetes	Linux	Si
<b>Pathchar</b>	GPL	1997	REAL	PRM	Activa - Pasiva	Trenes o Pares de paquetes	Linux	No
<b>IGI</b>	GPL	2002	REAL	PGM	Activa	Trenes o Pares de paquetes	Linux	No
<b>Cprobe</b>	GPL	1996	REAL	PGM	Activa	Trenes o Pares de paquetes	Linux	No
<b>Abing</b>	GPL	2003	REAL	PGM	Activa	Trenes o Pares de paquetes	Linux	No

Nota: Fuente de los autores

En la tabla 1, se puede apreciar la caracterización de algunas de las herramientas ABETS en donde se puede apreciar:

- Todas las herramientas son opensource
- Estas herramientas son para arquitectura Linux
- Las herramientas son evaluadas en tiempo real
- La gran mayoría son Activa.
- Gran parte de las herramientas utiliza el envío de trenes de paquetes UDP
- Estas herramientas no son parametrizables

## 5.4 TestBed

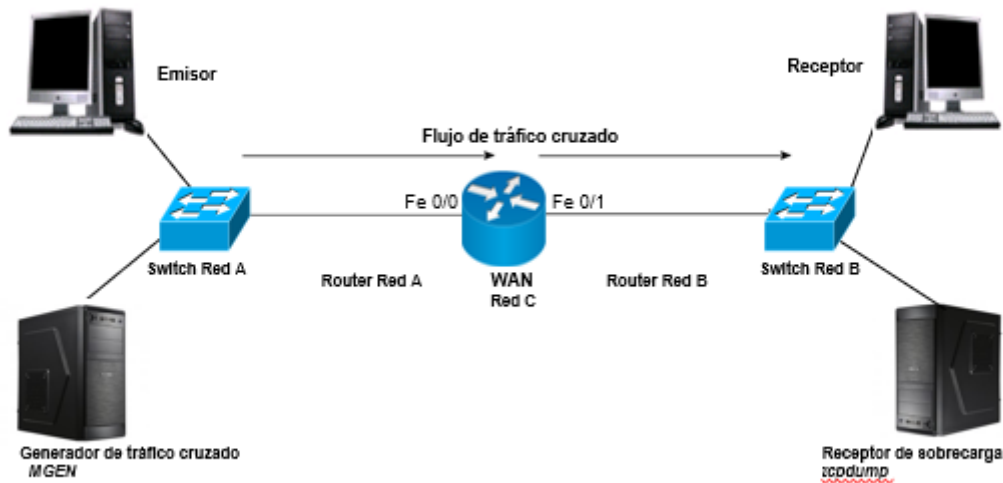
### 5.4.1 Definición.

Un banco de pruebas (testbed) es una plataforma para experimentación de proyectos de gran desarrollo. Los Testbed (Tb) brindan una forma de comprobación rigurosa, transparente y repetible de teorías científicas, elementos computacionales, y otras nuevas tecnologías.

El término se usa en varias disciplinas para describir un ambiente de desarrollo que está protegido de los riesgos de las pruebas en un ambiente de producción. Es un método para probar un módulo particular (función, clase, o biblioteca) en forma aislada. Un Tb se usa cuando un nuevo módulo se prueba aparte del programa al que luego será agregado (López Castell, 2012). Existen varios Tb como: PLANETLAB, MODELNET y WEB100.

El Tb usado por Traceband (C. Guerrero & Labrador., 2010b) se muestra en la Figura 8. Este es un ambiente totalmente controlado con un 10 Mbps de capacidad del enlace estrecho. El Cross-traffic se genera a partir del anfitrión llamado MGEN(Generador de tráfico). al host llamado TCPDUMP (Receptor de tráfico) y la estimación se lleva a cabo del emisor al receptor. El Multi-generator se utiliza para generar ráfagas de Poisson y experimentos Cross-traffic, sino

que permite el envío de Cross-traffic a velocidades diferentes y con diferentes distribuciones de probabilidad.



**Figura 5.** Testbed especializado de red. Fuente de los autores

Dentro de las posibilidades, para la evaluación del desempeño de las herramientas de estimación de ancho de banda disponible, que es objeto de este proyecto, se utilizará un Tb muy aproximado en arquitectura, con algunas modificaciones de acuerdo al tipo de estimación que se vaya a realizar.

## 5.5 Redes Wireless

### 5.5.1 Definición

Red inalámbrica (Wireless network). Es un término que se utiliza en informática para designar la conexión de nodos sin necesidad de una conexión física (cables), ésta se da por medio de ondas electromagnéticas. La transmisión y la recepción se realizan a través de puertos. (Rizwan et al., 2019)

Una de sus principales ventajas es notable en los costos, ya que se elimina todo el cable ethernet y conexiones físicas entre nodos, pero también tiene una desventaja considerable ya que para este tipo de red se debe de tener una seguridad mucho más exigente y robusta para evitar a los intrusos. En la actualidad las redes inalámbricas son una de las tecnologías más prometedoras.

Los tipos de redes wireless dependen de su alcance y el tipo de onda electromagnética utilizada.

### **5.5.2 Tipos de redes Wireless**

#### **5.5.2.1 WPAN (*Wireless Personal Area Network*)**

Este tipo de red se utiliza con tecnologías tales como Homero, Bluetooth ZigBee y RFID. Es una red personal y de corto alcance, las tecnologías que lo utilizan pueden conectar los teléfonos móviles de la casa y los ordenadores mediante un aparato central. Necesita comunicaciones seguras con tasas bajas de transmisiones de datos y bajo consumo (Rizwan et al., 2019).

En este tipo de red existen tecnologías basadas en:

- HomeRF, para conectar los teléfonos móviles de la casa y los ordenadores por medio de un aparato central.
- Bluetooth, protocolo que sigue la especificación IEEE 802.15.1.
- ZigBee, basado en la especificación IEEE 802.15.4 y se utiliza en domótica

#### **5.5.2.2 WLAN: (*Wireless Local Area Network*)**

En las redes de área local podemos encontrar tecnologías inalámbricas basadas en HiperLAN (High Performance Radio LAN), o tecnologías basadas en Wi-Fi (Wireless Fidelity)

En las redes de área local podemos encontrar tecnologías basadas en:



- HIPERLAN, un estándar del grupo ETSI
- Wi-Fi, siguen el estándar IEEE 802.11 con diferentes variantes.
- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network, Wireless MAN), la tecnología más popular que utiliza es WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access), un estándar de comunicación inalámbrica basado en la norma IEEE 802.16. Es muy parecido a Wi-Fi, pero tiene más cobertura y ancho de banda
- WWAN (Wide Area Network, Wireless WAN) es la red que se utiliza para los teléfonos móviles de segunda y tercera generación (UMTS) y para los móviles GPRS (tecnología digital).

### **5.5.3 Tipos de ondas posibles.**

#### **5.5.3.1 Ondas de Radio**

Son omnidireccionales, no tienen necesidad de una parabólica y no tienen ninguna sensibilidad a los cambios climáticos como la lluvia. Hay varios tipos de banda y se pueden transmitir de entre 3 a 30Hz y un máximo de 300 a 3000Hz.

#### **5.5.3.2 Microondas Terrestres**

Las antenas parabólicas se envían la información, alcanza kilómetros, pero el emisor y el receptor deben estar perfectamente alineados. Su frecuencia es de 1 a 300Ghz.

#### **5.5.3.3 Microondas por Satélite**

La información se reenvía de un satélite, es de las ondas más flexibles, pero igualmente es la que tiene mayor facilidad a la hora de sufrir interferencias, para este tipo de conectividad uno de los servicios de Red que se puede utilizar es BGAN.

#### **5.5.3.4 Infrarrojo**

Deben estar alineados directamente, no atraviesa paredes y tiene una frecuencia de 300GHz a 384THz.

## **5.6 Redes heterogéneas de computadoras.**

### **5.6.1 Definición.**

Las redes heterogéneas de computadoras son redes de conexión de computadores y otros dispositivos con diferentes sistemas operativos y/o protocolos. (Tigrero, González, & Guarda, 2018) es decir dichas redes están compuestas por un enlace troncal cableado y un enlace troncal inalámbrico, pero estas troncales no se están separadas.

El concepto de redes heterogéneas o Hetnet también es utilizado en redes inalámbricas en diferentes tipos de nodos. Usualmente está compuesta de tecnologías de acceso de radio, soluciones de transmisión y bases de transmisión. Las redes heterogéneas son parte esencial de los operadores móviles, dado el incremento del consumo de ancho de banda por parte de sus usuarios desde diferentes dispositivos como smartphones o tablets.(Huidobro, 2013)

También una red heterogénea puede ser una red inalámbrica que utiliza diferentes tecnologías de acceso. Redes heterogéneas, redes híbridas y protocolos inalámbricos de redes LAN.

## **5.7 Redes híbridas.**

### **5.7.1 Definición.**

Una red híbrida es una red que combina las mejores características de dos o más redes diferentes, lo cual las hace versátiles y confiables. Proporcionan un gran número de conexiones y caminos de transmisión de datos para los usuarios.(Rizwan et al., 2019)

### **5.7.2 Tipos de redes híbridas.**

Los dos tipos principales de redes híbridas son el anillo de estrella y el bus de estrella por cable. Una red de anillo de estrella híbrido con cable combina el diseño físico de una red en estrella y la topología lógica (o el flujo de datos) de una red en anillo. La red de bus de estrella por cable utiliza la distribución física de una red en estrella y la transmisión de datos de una red de bus. (Rizwan et al., 2019)

## **6 Marco legal**

### **6.1 Internacional**

#### **6.1.1 Actas Finales de la Conferencia Mundial de Telecomunicaciones Internacionales (CMTI-12) Dubai, 2012.**

“El Reglamento de las Telecomunicaciones Internacionales (RTI), servirá como tratado mundial vinculante destinado a facilitar la interconexión e interoperabilidad de los servicios de información y comunicación, así como a garantizar su eficiencia y su utilidad y disponibilidad generalizada para el público. El tratado establece unos principios generales destinados a asegurar la libre circulación de información en todo el mundo, promover un acceso asequible y equitativo para todos y sentar las bases para la permanente innovación y el crecimiento del mercado.”

### **6.2 Nacional**

#### **6.2.1 Ley No. 1341 de 30 Julio de 2009**

“Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones -TIC-, se crea la agencia nacional de espectro y se dictan otras disposiciones”

##### **6.2.1.1 Artículo 11 – Acceso al uso del espectro Radioeléctrico.**

“El uso del espectro radioeléctrico requiere permiso previo, expreso y otorgado por el Ministerios de Tecnologías de la Información y las comunicaciones

**6.2.1.2 Artículo 19 - Creación, naturaleza y objeto de la Comisión de Regulación de Comunicaciones.**

“La Comisión de Regulación de Telecomunicaciones (CRT) de que trata la ley 142 de 1994, se denominara Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC).

La Comisión de Regulación de Comunicaciones es el órgano encargado de promover la competencia, evitar el abuso de posición dominante y regular los mercados de las redes y los servicios de comunicaciones; con el fin que la prestación de los servicios sea económicamente eficiente y refleje altos niveles de calidad.”

**6.2.1.3 Artículo 34 – Naturaleza y Objeto del Fondo de tecnologías de la información y las comunicaciones.**

“El fondo de comunicaciones de que trata el decreto 129 de 1976, en adelante se denominará Fondo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones”

**6.2.1.4 Artículo 35 – Funciones del fondo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.**

“El fondo de tecnologías de la información y las comunicaciones tendrá las siguientes funciones:

Función 2. Financiar planes, programas y proyectos para promover la investigación el desarrollo y la innovación de las Tecnologías de Información y Comunicaciones dando prioridad al desarrollo de contenidos.

Función 4. Financiar y establecer planes, programas y proyectos que permitan masificar el uso y apropiación de Tecnologías de la Información y las comunicaciones”

### **6.2.2 Resolución 5397 de 2018**

“Por la cual se modifica la sección 5 del capítulo 1 Titulo V de la Resolución CRC 5050 de 2016. Considera:

- Que el artículo 78 de la constitución política dispone que la Ley regulará el control de calidad de bienes y servicios ofrecidos y prestados a la comunidad
- Que el artículo 365 de la constitución política establece que el estado mantendrá la regulación control y vigilancia de los servicios públicos, en procura de garantizar el mejoramiento continuo en la prestación de dichos servicios y la satisfacción del interés social.
- Que en atención al referido mandato, y en el marco de sus competencias, esta Comisión expidió la Resolución CRC 5161 de 2017, "Por la cual se establecen las definiciones y condiciones regulatorias de banda ancha en el país, y se dictan otras disposiciones, como resultado de los análisis requeridos para establecer condiciones que faciliten un mejor aprovechamiento de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones -TIC- para el desarrollo social y económico de las regiones, en donde se adoptó una definición de banda ancha con velocidad de bajada de 25 Mbps y de subida de 5 Mbps, aplicable a partir del 1° de enero de 2019”

## 7 Diseño metodológico

Para lograr los objetivos de esta investigación, se desarrollaron una serie de actividades; y así mismo, se obtuvieron productos relacionados con esas actividades que se describen con mayor detalle en la tabla 2.

### Descripción del proceso investigativo

**Tabla 2.**

*Descripción del proceso investigativo.*

Objetivo	Descripción	Productos
Estudiar las características de las herramientas de estimación de ancho de banda disponible más evaluadas en infraestructuras de redes de computadoras reales.	Los resultados de las pruebas serán estudiados a modo de entender cómo funcionan específicamente cada una de las herramientas y su comportamiento en la infraestructura de red.	Informe de las herramientas y su comportamiento en la infraestructura de red
Diseñar e implementar una infraestructura heterogénea de red de computadores real para evaluar las herramientas de estimación de ancho de banda disponible.	Se usarán diversos equipos para realizar una infraestructura que permita el trabajo.	Infraestructura de red que permita el estudio de las herramientas y su comportamiento en la misma.
Evaluar el comportamiento del tráfico en el enlace troncal cableado frente al enlace inalámbrico, respecto a latencia, capacidad, ancho de banda disponible, y paquetes perdidos.	Se tomarán los resultados en características específicas de la red, para evaluar las herramientas entre sí con medidas específicas.	Evaluación de las medidas específicas de cada una de las herramientas de red.
Comparar el rendimiento de las herramientas de estimación de ancho de banda disponible respecto a precisión, tiempo de estimación, y sobrecarga introducida.	Con la comparación de resultado, se podrá concluir cuál de las herramientas sobresale en rendimiento según medidas específicas tomadas.	Conocimiento sobre que herramienta sobresale en el rendimiento según las medidas específicas tomadas.

Nota: Fuente de los autores

### 7.1 Tipo de Investigación y alcance

En esta investigación implementamos una metodología experimental en donde se podrá observar, manipular, controlar y llevar un registro de las variables que intervienen en la evaluación del `ab_disp`.

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron dos infraestructuras de red en donde se comprobará y se determinará; el comportamiento y el rendimiento de los enlaces utilizando un envío de paquetes controlados y con las herramientas de `ab_disp`, se analizarán el tráfico de paquetes en dichos enlaces. Esto permitirá evaluar y determinar si las herramientas son eficientes al calcular el `ab_disp`.

### 7.2 Área de estudio y Montaje de Pruebas

El proyecto de investigación se desarrolló en el laboratorio de redes (Figura 6)) de la Universidad de la Costa (CUC, Figura 7.), ubicada en la ciudad de Barranquilla. En este fue posible realizar los montajes de las dos infraestructuras de redes a evaluar.



**Figura 6.** Laboratorio de redes CUC. Fuente: <http://ingenieria.cuc.edu.co/ingenieria-de-sistemas/informacion-academica/laboratorios>



*Figura 7.* Universidad de la Costa CUC. Fuente: Google Earth (2020)

## **7.3 Fases de la Investigación**

### **7.3.1 Fase 1: Desarrollo de la Investigación**

El desarrollo de la investigación se hará por etapas de acuerdo con cada objetivo planteado.

#### ***7.3.1.1 Revisión de modelos y métodos***

Inicialmente, se revisarán y estudiarán los modelos y métodos de estimación de  $ab\_disp$  existentes, y se realizará un análisis detallado de las herramientas desarrolladas y evaluadas en infraestructuras de redes cableadas e inalámbricas a la fecha. Esto permitirá conocer qué tipo de testbed han utilizado los investigadores para evaluar las herramientas de  $ab\_disp$ .

#### ***7.3.1.2 Diseño e implementación de la Infraestructura***

Se diseñará e implementará una infraestructura heterogénea de red de computadores real para evaluar tanto protocolos de red como de las herramientas de estimación  $ab\_disp$ . Para lograr lo



anterior, se instalarán y configurarán equipos de comunicación, hosts y sistemas operativos GNU-Linux, de igual manera otras herramientas de análisis de red.

Finalmente, se escogieron dos escenarios de red; el primero representado en la figura 8 con Testbed de red especializado con troncal cableada. El segundo escenario, está representado en la figura 9, como Testbed de red especializado con troncal inalámbrica. Es importante aclarar, que los escenarios fueron seleccionados, debido que, en la literatura revisada no se encontraron estudios que presentaron en un mismo trabajo la evaluación de ambos escenarios; que faciliten conocer el estado o comportamiento del tráfico de Internet a través de los escenarios planteados.

#### ***7.3.1.3 Evaluación del comportamiento de los enlaces troncales***

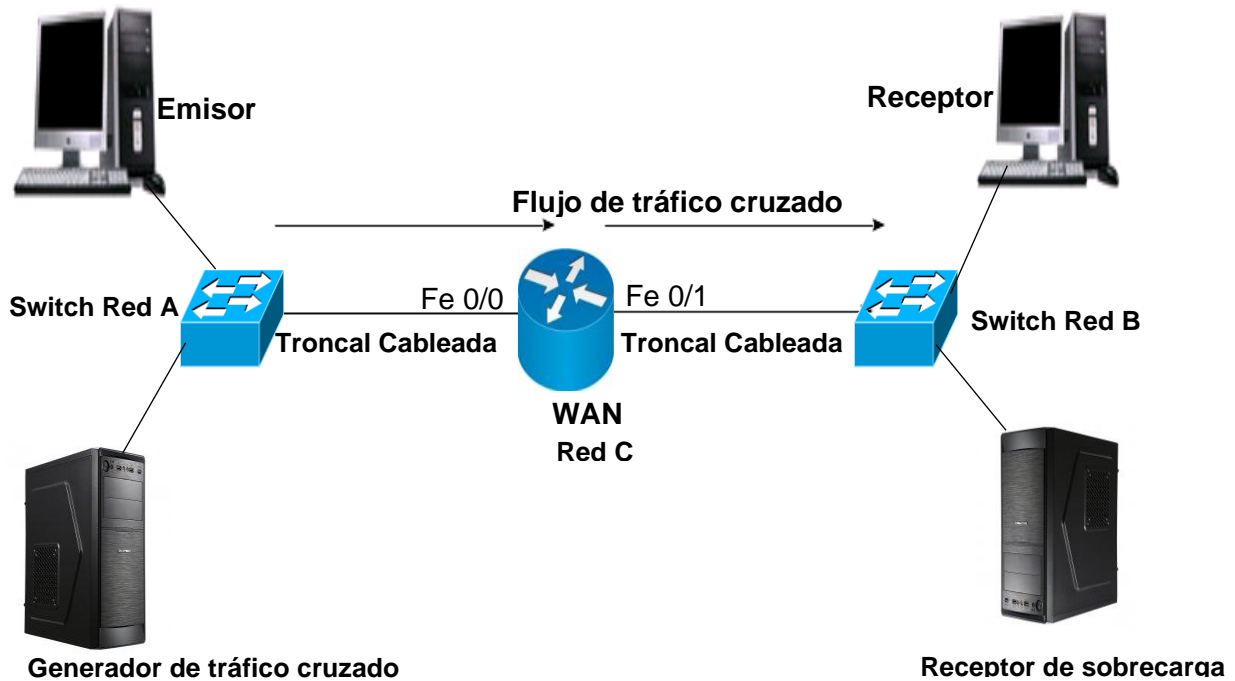
Posteriormente se evaluó el comportamiento del tráfico en el enlace troncal cableado frente al enlace inalámbrico, respecto a latencia, capacidad, ancho de banda disponible, y paquetes perdidos; se diseñarán y ejecutarán experimentos en el Tb de red configurado en la etapa anterior.

#### ***7.3.1.4 Comparación de las herramientas***

Se comparará el rendimiento de las herramientas de estimación de ancho de banda disponible respecto a precisión, tiempo de estimación, y sobrecarga inducida. Permitiendo la tabulación de los datos obtenidos en los experimentos realizados, y así mismo para analizar y presentar la información procesada.

### **7.3.2 Fase 2: Construcción Testbed**

Principalmente, a nivel de hardware para la evaluación experimental de las dos infraestructuras de red, construimos un Tb especializado para cada escenario.



**Figura 8.** Testbed de red especializado con troncal cableada. Fuente de los autores

Los primeros Tb fueron completamente controlados y configurables con respecto al tamaño del paquete y el entorno de propagación; ver la Figura 8. El nivel de hardware Tb tiene los siguientes componentes:

- 4 computadoras correspondientes al host, que le permiten interactuar con la red y realizar todas las pruebas necesarias, equipadas con suficiente potencia de procesamiento para soportar el rendimiento que los experimentos requieren velocidades de CPU de hasta 3.4GHz, y todos ellos con GNU-Linux, consulte la Tabla 3.
- Para que cada host se comuniquen con los demás, cada red tiene un Cisco Switch, que puede operar a 100Mbps.
- Además, para interconectar la red A con la red B, la red tiene un Router de la serie CISCO (100 Mbps).

- Cada Switch está conectado a una interfaz (LAN) del router.

**Tabla 3.***Características de los hosts*

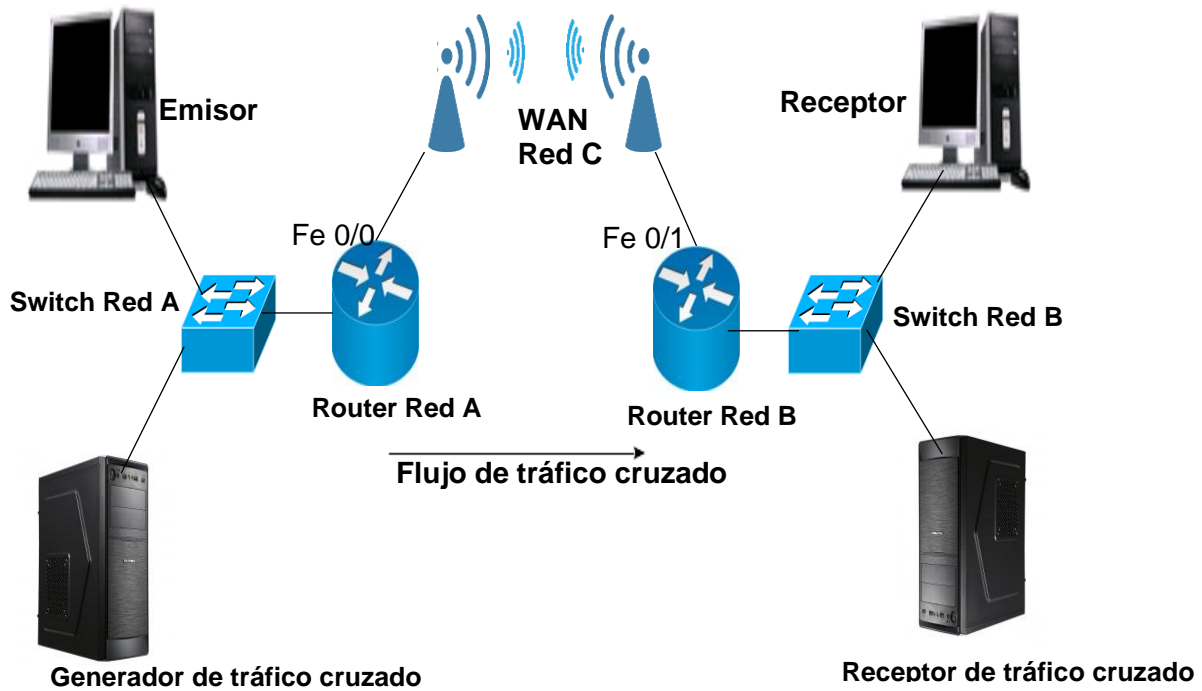
Host	Sistema Operativo	Arquitectura	CPU-Clock (Mhz)
Generador de tráfico cruzado	Ubuntu-Linux 18.04	X86_64	Intel Core i7 3.4 GHz
Receptor de sobrecarga	Ubuntu-Linux 18.04	X86_64	Intel Core i7 3.4 GHz
Nodo Emisor	Ubuntu-Linux 18.04	X86_64	Intel Core i7 3.4 GHz
Nodo Receptor	Debian-Linux Ubuntu-Linux 18.048.3	X86_64	Intel Core i7 3.4 GHz

Nota: Fuente de los autores

El segundo Tb, es un poco diferente al que ya se presentó anteriormente en la figura 8; debido a que se agrega un router y se presenta un cambio en la red C, constituido por un enlace inalámbrico, donde dos AP Cisco se conecta para simular un enlace troncal, ver Figura 9.

Cada Switch está conectado a la interfaz (LAN) FE0 / 0 de su respectivo router, también están interconectados utilizando la interfaz FE0 / 1, simulando así un enlace troncal. enlace, configurando la red C.

Esta infraestructura de red heterogénea representada en la figura 9 es considerada heterogénea; debido a que presentan en su infraestructura enlace cableado en la Red LAN, y un enlace inalámbrico, que es el enlace troncal.



**Figura 9.** Testbed de red especializado con troncal inalámbrica. Fuente de los autores

A nivel de software, el Tb tiene dos elementos principales. Primero, ABET seleccionado para evaluar, se instaló y configuró en el host respectivo, principalmente en el host del emisor y del receptor.

Por otro lado, nos vimos obligados a simular un enlace de congestión y control de tráfico cruzado, para determinar el comportamiento y el rendimiento de los enlaces. Por lo tanto, los generadores usaron paquetes (tráfico sintético) para estimar. Para seleccionar un generador de paquetes de tráfico sintético, se analizaron tres aspectos importantes. Inicialmente, replica las trazas (archivos PCAP), lo que también permite escalar la velocidad de transmisión del tráfico (0% a 50%) en el enlace utilizado. Finalmente, se ha implementado en un Tb real y no en una simulación (por ejemplo, NS-3). En consecuencia, la herramienta para generar el tráfico sintético es la que se describe a continuación:

• MGEN, es fácil de usar, debido a la flexibilidad de los parámetros (protocolo, eventos Tx y Rx, etc.) de cada tipo de tráfico generado. También permite que el tráfico genere una traza previamente capturada en un archivo pcap. Esto hace que usar el parámetro CLONE pero no pueda escalar la cantidad que se va a introducir en la red. Es importante aclarar que con otras opciones como POISSON o BURST, entre otras, Mgen puede escalar el tráfico.

### 7.3.3 Fase 3: Análisis estadístico

Para evaluar la funcionalidad y el rendimiento de las herramientas seleccionadas, se diseñó un grupo de escenarios con diferentes tipos de tráfico (escalamos la traza), ya que la herramienta generadora de tráfico tcpreplay tiene esta capacidad. Para escalar la traza definida usando el parámetro Mbps, que permite inundar el canal a una cantidad controlable de datos, alcanzando una precisión de 1  $\mu$ s.

Dado lo anterior y de acuerdo con la cantidad de tráfico; Los escenarios a evaluar son:

Sin tráfico, con 0% y 50% de CT; con 30 experimentos se realizaron para cada escenario, para tener 30 evaluaciones para cada herramienta, y así lograr un total de 90 experimentos por etapa y 180 experimentos en total, que se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.**

*Descripción de pruebas*

Escenarios	Cross-Traffic	Experimentos	Herramientas	Total
1	0%	30	3	90
2	50%	30	3	90
<b>Total</b>				180

Nota: Fuente de los autores

Finalmente, las métricas seleccionadas para evaluar el rendimiento de los enlaces y de la red son la latencia, y el ancho de banda disponible, debido a que pueden determinar el comportamiento de los enlaces en relación con los controles de este trabajo.

#### 7.4 Herramientas *ab\_disp* evaluadas:

Todas las herramientas evaluadas *ab\_disp* son activas e intrusivas; y fueron cuidadosamente seleccionados en la revisión, de los cuales 26 herramientas preseleccionadas (Salcedo et al., 2018). Luego, los 26 se filtraron de acuerdo con los siguientes criterios tal como lo realizado Salcedo en (Salcedo et al., 2017). Por lo tanto, las herramientas seleccionadas se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.**

*Herramientas *ab\_disp* evaluadas*

Herramientas	Num. evaluaciones por otros autores
IGI	9
Pathload	22
Traceband	3

Nota: Fuente de los autores

## 8 Resultados y análisis

Las herramientas descritas en la sección anterior fueron evaluadas utilizando un ancho de banda real de 100 Mbps para enlace troncal cableado; y el enlace troncal inalámbrico con 54 Mbps. En consecuencia, esta evaluación permitió estimar el `ab_disp`, y el tiempo de estimación utilizado por cada herramienta en cada uno de los escenarios y experimentos ejecutados.

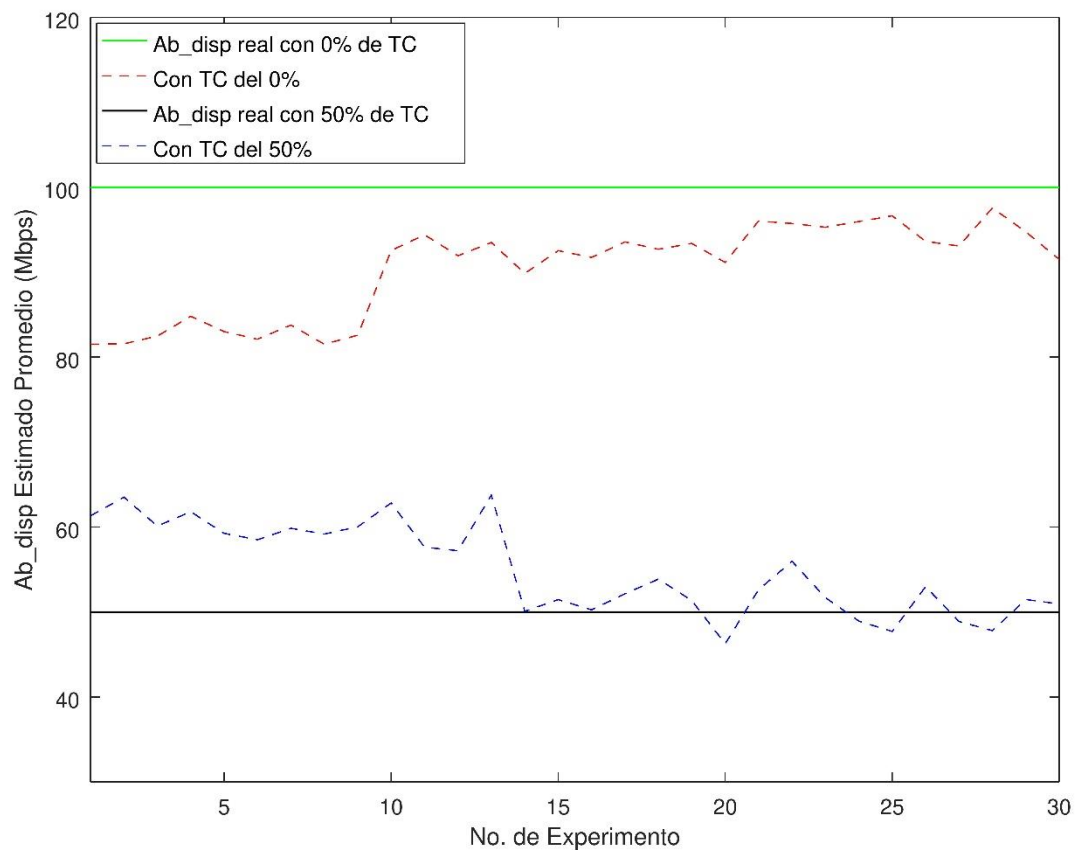
### 8.1 Enlace troncal cableado

Inicialmente, al analizar los resultados promedios obtenidos de las tres herramientas (IGI, Traceband, y Pathload) para evaluar el enlace troncal cableado (Ver figura 10); encontramos que cuando se realiza la estimación del `ab_disp` con tráfico cruzado del 0%, las herramientas en los primeros 10 experimentos muestran un rendimiento bajo; debido a que estiman el `ab_disp` lejos del valor real, pero después del experimento 12 mejora, aunque continua aproximadamente un 28% del valor real esperado. Adicionalmente, se debe destacar que Traceband cuando el tráfico cruzado es del 0%, escucha el enlace totalmente disponible, es decir al 100%.

Por otro lado, cuando se evalúo el enlace troncal con tráfico cruzado del 50%, las herramientas muestran hasta el experimento 13 un comportamiento no ideal, debido a que sobre estimar el `ab_disp` respecto al valor esperado. Sin embargo, luego se puede observar que la estimación del `ab_disp` conserva un comportamiento estable del 90%, debido a que está muy cerca del valor real esperado, ver Figura 10.

En relación con lo anterior, se pueden determinar dos cosas. Primero, cuando se estima el `ab_disp` en un enlace troncal cableado con 0% de tráfico cruzado, no se puede concluir que se encuentra completamente disponible, debido a que las herramientas presentan un error en la medida conocido como sobrecarga (overhead); que se produce al no tener en cuenta la estimación del tráfico de prueba utilizado para realizar la estimación (Guerrero, C., & Labrador.,

M. 2010). Sin embargo, cuando se evalúa el enlace troncal cableado con 50% de tráfico cruzado, se puede determinar que aunque el valor estimado del `ab_disp` presenta un error promedio máximo del 20%, es una medida que puede ser confiable para evaluar este tipo de escenarios, debido a que a nivel teórico se infiere que un enlace troncal en Internet normalmente tiene mínimo un 30% de tráfico cruzado, que se asocia al comportamiento en ráfaga del tráfico en Internet.

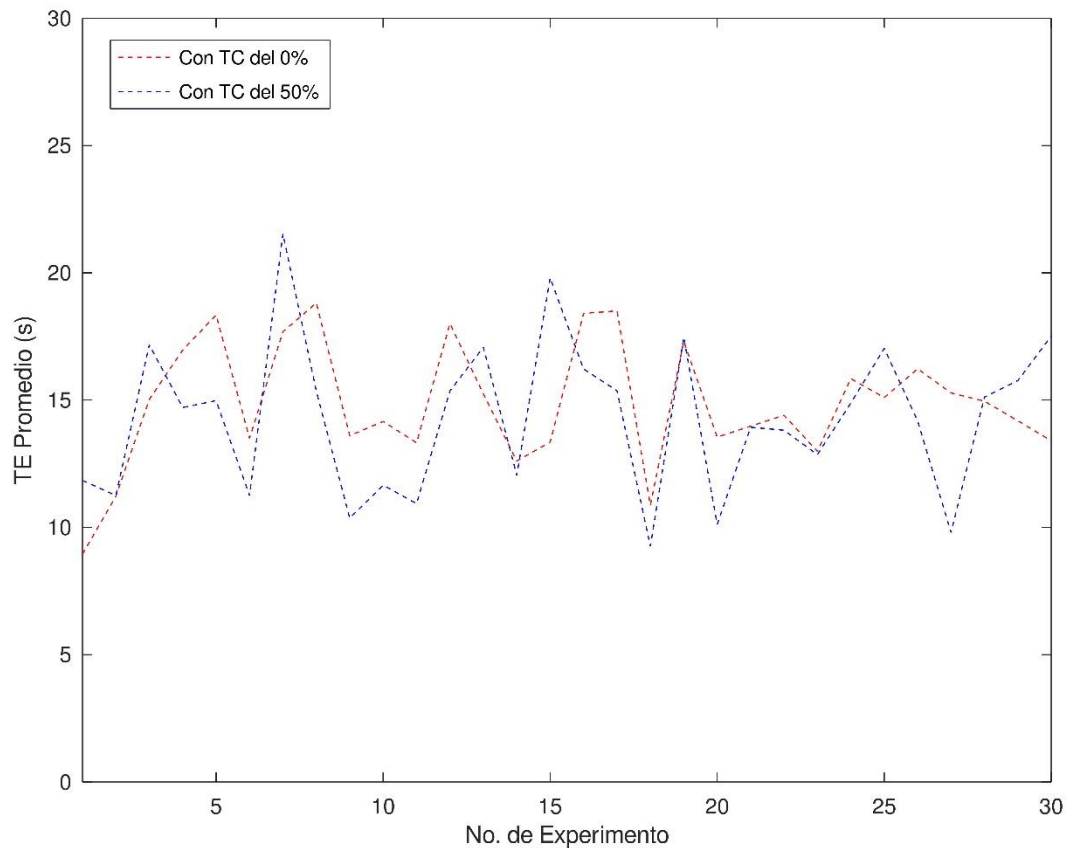


**Figura 10.** Promedio de Ancho de banda disponible estimado en un enlace troncal cableado con 0% y 50% de tráfico cruzado. Fuente de los autores

Ahora, al analizar el tiempo de estimación promedio utilizado por las herramientas para estimar el `ab_disp`, ver figura 11. Se puede observar, que cuando el enlace troncal cableado tiene 0% tráfico cruzado las herramientas usan menos tiempo para estimar el `ab_disp`, que oscila entre



9s y 13s; mientras que el mismo enlace con tráfico cruzado del 50%, el tiempo de estimación es mayor. Lo anterior, se asocia con la congestión del enlace evaluado, debido a que un enlace con mayor tráfico cruzado, el tráfico de prueba usado por las herramientas de estimación interactúa con el tráfico cruzado, que ocasiona que las herramientas sean más lentas para obtener los resultados.



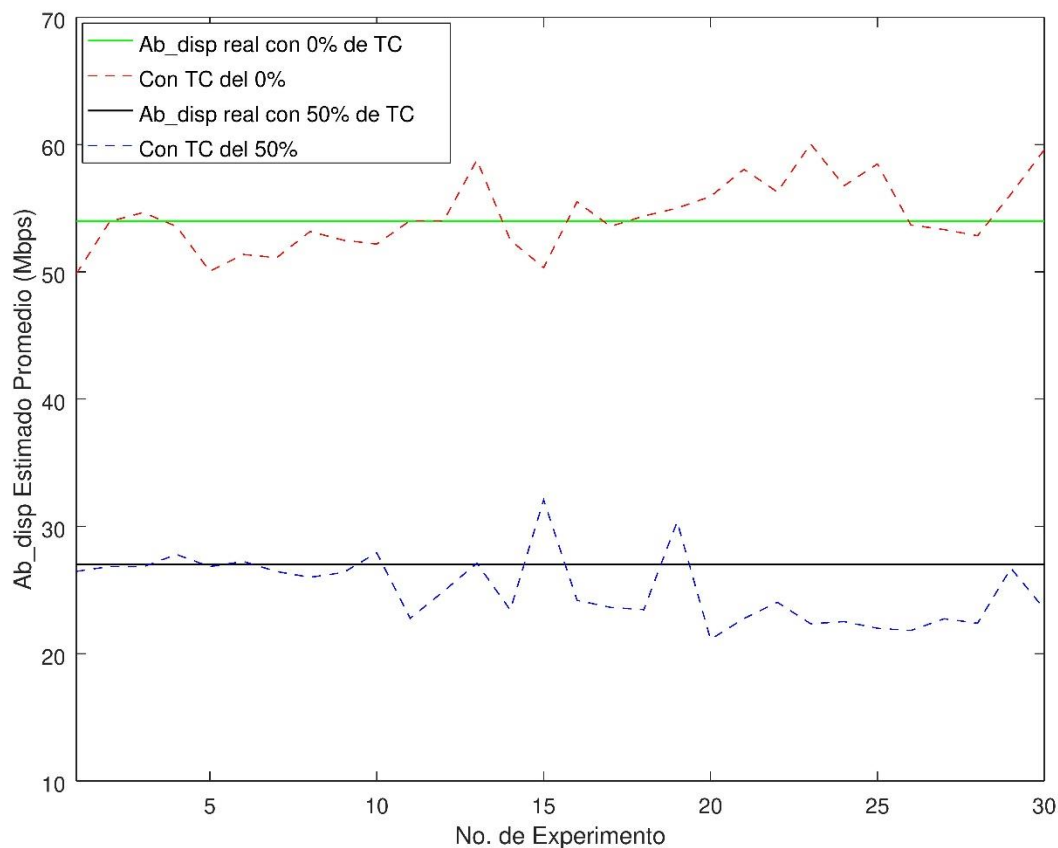
**Figura 11.** Tiempo de estimación promedio para realizar una estimación en un enlace troncal cableado con 0% y 50% de tráfico cruzado. Fuente de los autores

## 8.2 Enlace troncal inalámbrico

Los resultados obtenidos al evaluar el enlace troncal inalámbrico (ver Figura 12), usando las herramientas de estimación IGI, Traceband, y Pathload; muestran que al estimar el ab\_disp del enlace troncal inalámbrico, con tráfico cruzado del 0%; las herramientas muestran rendimiento

bajo, debido a que subestima y sobre estima el  $ab\_disp$  respecto al valor real, con valores de 8% y 12% respectivamente. Sin embargo, cuando se evaluó el mismo enlace troncal con tráfico cruzado del 50%, las herramientas muestran un mejor rendimiento; debido a que subestima y sobre estima el  $ab\_disp$  respecto al valor real, con valores de 4% y 7% respectivamente.

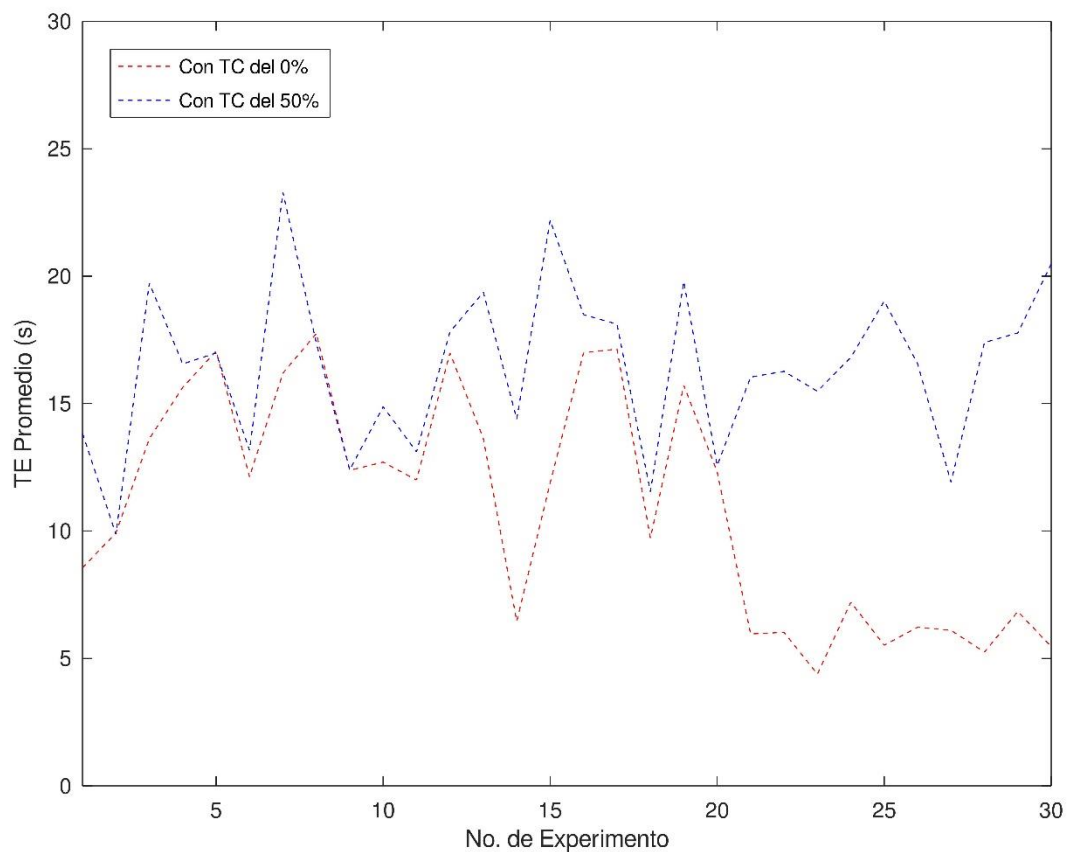
Lo anterior, permite afirmar que para enlaces troncales inalámbricos las herramientas de estimación permiten conocer el comportamiento del enlace, siendo más preciso este resultado cuando el enlace tiene aproximadamente el 50% de tráfico cruzado.



**Figura 12.** Promedio para realizar una estimación en un enlace troncal inalámbrico con 0% y 50% de tráfico cruzado. Fuente de los autores

Por otro parte, para el tiempo de estimación promedio calculado al evaluar el enlace troncal inalámbrico con las herramientas de estimación, ver figura 13. Se puede observar, que para 0% y

50% de tráfico cruzado las herramientas son lentas en comparación con lo conocido en la literatura para herramientas como Traceband (Guerrero, C., & Labrador., M. 2010); debido a que alcanza hasta 17s y 24s, para el tráfico cruzado del 0% y 50% respectivamente. Por último, estos tiempos de estimación altos para ambos escenarios de tráfico cruzado, se relacionan con la latencia que adiciona el enlace inalámbrico en los procesos de transmisión y recepción de datos en la capa física del modelo de red.



**Figura 13.** Tiempo de estimación promedio para realizar una estimación en un enlace troncal inalámbrico con 0% y 50% de tráfico cruzado. Fuente de los autores

Finalmente, al comparar los resultados obtenidos para el enlace troncal cableado con el inalámbrico, se pueden definir dos aspectos importantes. En primer lugar, en referencia al ab\_disp, las herramientas presentaron mejor rendimiento en el enlace troncal inalámbrico; debido

a que alcanzaron precisión máxima del 96%, mientras que para el enlace cableado fue del 90%, (ver Figuras 10 y 12). En segundo lugar, al observar el tiempo de estimación utilizado por las herramientas (ver Figuras 11 y 13); se puede observar que el rendimiento es levemente mejor en el escenario del enlace troncal cableado. Así que, aunque el tiempo de estimación alcanza 20s en una de las estimaciones, se puede afirmar que es menor, comparado con el tiempo utilizado por las herramientas al evaluar el enlace troncal inalámbrico, que alcanza entre 15s y 23s.

## 9 Conclusiones

Finalmente, con las pruebas realizadas durante el proyecto se pudo determinar que al evaluar el enlace troncal cableado e inalámbrico, las estimaciones del  $ab\_disp$  en unos enlaces con tráfico del 50% se pueden obtener valores con una precisión aceptable para tomar decisiones respecto a la administración de recursos de ancho de banda, que es una métrica importante en el rendimiento de servicios en tiempo real. Por otro lado, se validó que valor estimado del  $ab\_disp$  con 0% de tráfico cruzado, no se puede utilizar para determinar si un enlace troncal disponible en su totalidad (100%).

Adicional, el tiempo de estimación encontrado al evaluar las herramientas, demostró que para enlaces troncales inalámbricos se maneja mayor latencia al tráfico cruzado del enlace; convirtiendo los enlaces inalámbricos en un cuello de botella para aplicaciones que basan su calidad de servicio en altas tasas de transferencia de bits.

Durante la realización del proyecto se lograron conocer las características de las herramientas estudiadas para estimar el  $ab\_disp$ ; además al diseñar el Tb implementamos una infraestructura heterogénea de redes de computadores en donde evaluamos y comparamos los enlaces troncales y pudimos observar capacidad de los enlaces, latencia y pérdida de paquetes; simultáneamente se calcularon los tiempos de estimación y se indujo una sobrecarga para observar el comportamiento de las herramientas y determinar si estas, podrían ser de utilidad para las empresas prestadoras de servicios o los administradores de red para continuar en la mejora continua del servicio de calidad ofrecido.

Finalmente se comprobó que las métricas de las herramientas de estimación se pueden utilizar para evaluar y conocer el rendimiento de enlaces cableados e inalámbricos; este proyecto abre la puerta para iniciar evaluación de diferentes tipos de servicios de red que hoy son usados

en su gran mayoría por usuarios móviles; generando nuevos desafíos para mejorar o crear herramientas de estimación que permitan la selección de puntos de acceso a redes inalámbricas con mayores anchos de banda disponible y mejor estabilidad.

## 10 Referencias

- Amaya Carrión, E. W. (2018). Redes de computadoras. Introducción a las redes, necesidad de una red, tipo y equipos de redes, topología de una red, diseño de redes, instalación y administración de redes LAN. Retrieved from <http://repositorio.une.edu.pe/handle/UNE/4118>
- Bernhardt, M. (2019). Alineamiento de interferencia y autointerferencia en sistemas de comunicaciones inalámbricas de última generación. Retrieved from <http://bc2.uns.edu.ar/handle/123456789/4592>
- Carrasquilla Marín, S. M., & Ulloque Rodríguez, E. (2006). *Evaluación de técnicas de medición de ancho de banda disponible. recurso electrónico*. Bucaramanga. Retrieved from [https://catalogo.unab.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=147275&query\\_desc=su:“IP \[PROTOCOLO DE REDES DE COMPUTADORES\]” and au:Guerrero Santander, Cesar Darío](https://catalogo.unab.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=147275&query_desc=su:“IP [PROTOCOLO DE REDES DE COMPUTADORES]” and au:Guerrero Santander, Cesar Darío)
- Guerrero, C. D. (2009). Traceband: Available Bandwidth Estimation based on a Hidden Markov Model.
- Guerrero, C., & Labrador., M. (2010a). On the Applicability of Available Bandwidth Estimation Techniques and Tools. *Computer Communications*, 33(1), 11–22.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comcom.2009.08.010>
- Guerrero, C., & Labrador., M. (2010b). Traceband: A Fast, Low Overhead and Accurate Tool for Available Bandwidth Estimation and Monitoring. *Computer Networks*, 54(6), 977–990.  
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2009.09.024>
- (Google, s.f.) Google. (s.f.). [Universidad de la Costa CUC]. Recuperado el 21 de mayo de 2020 de <https://www.google.com/maps/@10.9947604,-74.7916412,139m/data=!3m1!1e3>

- Hinostroza, V., & Caden, G. C. L. (2015). Estimación y caracterización del canal de comunicación wimax. *Cultura Científica y Tecnológica*, (41). Retrieved from <http://148.210.132.19/ojs/index.php/culcyt/article/view/281>
- Huidobro, J. M. (2013). Redes heterogéneas. La solución para LTE. *Antena de Telecomunicación*, 1(1), 4. Retrieved from [https://www2.coitt.es/res/revistas/11a Redes.pdf](https://www2.coitt.es/res/revistas/11a%20Redes.pdf)
- Jiménez Velásquez, Á. L. (2019). Implementación y evaluación de una estrategia para garantizar mantenimiento de QoS en la transmisión de video en tiempo real en redes WLAN bajo el esquema de gestión SDN. Retrieved from <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/13873>
- Lakshminarayanan, K., Padmanabhan, V., & Padhye, J. (2004). Bandwidth Estimation in Broadband Access Networks. *Proceedings of the 4th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement.*, IMC '04 (pp. 314–321). Taormina, Sicily, Italy: ACM. doi:10.1145/1028788.1028832
- Li, M., Wu, Y., & Chang, C. (2013). Available Bandwidth Estimation for the Network Paths with Multiple Tight Links and Bursty Traffic. *Journal of Network and Computer Applications*, 36(1), 353–367. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2012.05.007>
- Londoño, E. E. Luis, Muñoz, Y. C. Wilmar, & Golondrino, G. E. C. (2019). Estimación de la calidad de la experiencia del videostreaming desplegado sobre redes WiFi 5 definidas por software. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 15–28. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/2317839169?accountid=41515>
- López Castell, Y. (2012). Evaluación de técnicas de estimación de ancho de banda disponible en una red de computadoras.



- Lozoya, C., Martz, P., Velasco, M., Fuertes, J., & Ayza, J. (n.d.). ESTIMACION DEL RETARDO EN UNA RED WIFI: ANALISIS COMPARATIVO. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/237655082\\_Estimacion\\_del\\_Retardo\\_en\\_una\\_Red\\_Wifi\\_Analisis\\_Comparativo](https://www.researchgate.net/publication/237655082_Estimacion_del_Retardo_en_una_Red_Wifi_Analisis_Comparativo)
- Nam, S., Kim, S., Lee, S., & Kim, H. (2013). Estimation of the Available Bandwidth Ratio of a Remote Link or Path Segments. *Computer Networks*, 57(1), 61–77. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2012.08.015>
- Nguyen, U., Tran, D., & Nguyen, G. (2014). A Taxonomy of Applying Filter Techniques to Improve the Available Bandwidth Estimations. *Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, ICUIMC '14* (pp. 18:1–18:8). Siem Reap, Cambodia: ACM. doi:10.1145/2557977.2558004
- Prasad, R., Dovrolis, C., Murray, M., & Claffy, K. (2003). Bandwidth Estimation: Metrics, Measurement Techniques, and Tools. *Network, IEEE*, 17(6), 27–35. doi:10.1109/MNET.2003.1248658
- Reyes, D. A., & Guerrero, C. D. (2016). Estimación de ancho de banda disponible por generación de paquetes de prueba a través de NetFPGA. *Revista Colombiana de Computación*, 17(1), 122–144. doi:10.29375/25392115.2626
- Rizwan, M., Shabbir, A., Shabbir, M., Ahmad, F., & Sattar, M. U. (2019). A Clustering based Hybrid Mobility in WPAN. *3rd International Conference on Innovative Computing, ICIC 2019*. doi:10.1109/ICIC48496.2019.8966743
- Salcedo, D., Guerrero, C. D., & Martinez, R. (2018). Available Bandwidth Estimation Tools: Metrics, Approach and Performance. *International Journal of Communication Networks and*

- Information Security*, 10(3), 580. Retrieved from  
<http://www.ijcnis.org/index.php/ijcnis/article/view/3516/324>
- Salcedo, D., Guerrero, C., & Guerrero, J. (2017). Overhead in Available Bandwidth Estimation Tools: Evaluation and Analysis. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, 9(3), 393–402. Retrieved from  
<http://www.ijcnis.org/index.php/ijcnis/article/view/2475>
- Sánchez, J. S. (n.d.). REDES INALAMBRICAS. DISEÑO DE UNA RED INALAMBRICA. *Enlace*, 1, 2\_B. Retrieved from  
[http://oa.upm.es/49902/1/PFC\\_JESUS\\_SANCHEZ\\_SANCHEZ.pdf](http://oa.upm.es/49902/1/PFC_JESUS_SANCHEZ_SANCHEZ.pdf)
- Tigero, D., González, J., & Guarda, T. (2018). Análisis de las Tecnologías de Redes Heterogéneas (HetNet) en los Sistemas Móviles. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, 181–186. Retrieved from  
<https://search.proquest.com/docview/2041143884?accountid=41515>
- Universidad de la Costa - CUC [Laboratorio de redes CUC.] Recuperado el 21 de mayo de 2020 de <http://ingenieria.cuc.edu.co/ingenieria-de-sistemas/informacion-academica/laboratorios>
- Yáñez-Sánchez, N. A., Ramírez, J. M., Paredes, J. L., Pinto, Á. D., Torres, J. M., & Pérez, M. L. (2019). Estimación robusta de canales de comunicaciones de ultra banda ancha. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 181–197. Retrieved from  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242019000100181&script=sci\\_abstract&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-33242019000100181&script=sci_abstract&tlng=en)
- Zhang, E. (2015). *Bandwidth Estimation for Virtual Networks*. University of Nebraska Lincoln. Retrieved from <http://digitalcommons.unl.edu/computerscidiss/95/>